

УДК 621.43.068.4-634.8

doi: 10.32620/aktt.2019.4.03

В. С. КОРНИЕНКО¹, Р. Н. РАДЧЕНКО²¹ *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Херсонский филиал, Украина*² *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИКЛОНА И ЭФФЕКТА "МИКРОВЗРЫВОВ" КАПЕЛЬ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЧИСТКЕ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Получение дополнительной энергии за счет глубокой утилизации тепловых потерь двигателя внутреннего сгорания (ДВС) позволяет экономить топливо, расходуемое на работу судовой энергетической установки. Это соответственно ведет к уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу, способствует удовлетворению более жестких норм Международной морской организации ИМО (International Maritime Organization), регламентирующей пределы этих выбросов. Целью исследования является разработка технологии комплексной очистки выхлопных газов ДВС. Для решения задач по технологии предлагаемого способа очистки выхлопных газов было предусмотрено 6 этапов технологического процесса. На основе проведенных экспериментально-теоретических исследований была разработана схема установки для комплексной очистки газов при использовании циклона и эффекта "микровзрывов" капель водотопливной эмульсии (ВТЭ). Установлено, что в результате горения активированной ВТЭ на выходе из двигателя получаем выхлопные газы соответствующего состава с уменьшенным количеством токсичных ингредиентов до 35 % и более и главное, близким к эквимолярному отношению NO_2/NO в NO_x . Проведенные экспериментальные исследования показали, что в конденсате кислоты при указанных условиях устанавливается средняя концентрация около 57 %, что и обеспечивает резкий рост абсорбции SO_2 и NO_x . Наличие в газах эквимолярного (или близкого к нему) соотношения NO_2/NO обеспечивает пассивацию конденсационной поверхности в утилизационном котле (УК) из углеродистой стали. Это обеспечивает резкое уменьшение интенсивности низкотемпературной коррозии, повышение надежности эксплуатации конденсационных поверхностей и возможность резкого увеличения глубины утилизации выхлопных газов двигателя до 80...90 °С вместо 160 °С. Для конечной очистки газов предложено установить на тракте газов ДВС скруббер Вентури и циклон-абсорбер. На основе экспериментальных исследований установлено, что установка конденсационной поверхности нагрева в УК снижает содержание в газах NO_x на 55 %, SO_2 - на 50 %, а содержание твердых частиц - в 3 раза. Разработанная комплексная система может использоваться для очистки выхлопных газов ДВС до уровня, рекомендованного ИМО.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; водотопливные эмульсии; циклон; скруббер Вентури; глубокая утилизация; низкотемпературная коррозия.

Введение

Получение дополнительной энергии за счет глубокой утилизации тепловых потерь двигателя внутреннего сгорания (ДВС) позволяет экономить топливо, расходуемое на работу судовой энергетической установки. Это соответственно ведет к уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу, способствует удовлетворению более жестких норм Международной морской организации ИМО (International Maritime Organization), регламентирующей пределы этих выбросов. Это требует разработки комплексной технологии, включающей такие этапы: сжигание водотопливной эмульсии (ВТЭ), глубокую утилизацию с использованием не только физической теплоты сжигания топлива, но и скры-

той теплоты конденсации паров H_2SO_4 и H_2O , содержащихся в выхлопных газах, очистку газов от токсичных ингредиентов с помощью скруббера и циклона.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

По мнению специалистов фирмы MAN [1], требования ИМО (III уровень из эмиссии SO_2 , NO_x) возможно выполнить с помощью технологий:

- 1) использование водотопливной эмульсии (ВТЭ) - WIF (Water in Fuel emulsion) [2];
- 2) увлажнение наддувочного воздуха - SAM (Scavenge Air Moistening);
- 3) рециркуляция выхлопных газов - EGR (Exhaust Gas Recirculation) [3];

4) селективное каталитическое снижение эмиссии NO_x - SCR (Selective Catalytic Reduction).

Для снижения выбросов NO_x перспективным является использование комбинированной схемы SAM & WIF: водяной пар в камере сгорания повышает тепловую мощность и снижает содержание O_2 . По мнению фирмы MAN [1], повышение тепловой мощности и снижение O_2 в наддувочном воздухе обеспечивает снижение температуры сгорания, что приводит к уменьшению эмиссии NO_x . При этом дополнительно надо отметить, что с понижением температуры сгорания увеличивается концентрация сажи, а также количество CO.

Использование технологии WIF приводит к увеличению расхода топлива до 1,2 % (если не обеспечивать применения конденсационных поверхностей при охлаждении газов ниже температуры точки росы паров H_2SO_4 и H_2O), технологии SAM – 2,3 %, технологии EGR – 4,6 %, технологии SCR – 7,5...15,0 % (учитывая цену мочевины). Но технология WIF обеспечивает уменьшение NO_x на 30 %, технология SAM – на 45 %, существующая система EGR – на 70 %; технология SCR – на 80 % (при необходимом уровне требований IMO (III уровень) – 80 % снижение NO_x). Кроме того, систему SCR обязательно надо сопровождать скрубберной технологией очистки от SO_2 .

Целью исследования является разработка технологии комплексной очистки выхлопных газов ДВС.

Методология исследований

Для решения задач по технологии предложенного способа предусмотрено 6 этапов технологического процесса:

- 1) кавитационная обработка воды и ВТЭ;
- 2) сжигание ВТЭ соответствующего качества с водосодержанием около 30 %;
- 3) установка конденсационных поверхностей нагрева;
- 4) продолжение интенсификации абсорбции на конденсационных поверхностях газоходов до скрубберной части;
- 5) применение интенсивных скрубберных технологий;
- 6) защита металла газоходов после скрубберов.

Результаты исследований

На основе проведенных экспериментально-теоретических исследований была разработана схема установки для комплексной очистки газов ДВС при использовании циклона и эффекта "микровзрыв" капель ВТЭ (рис. 1).

Основными элементами энергетической установки, в которой предусмотрено сжигание специально подготовленной ВТЭ с водосодержанием 30 %, являются ДВС и утилизационный котел (УК). В УК обязательно для выполнения задач устанавливается сухая конвективная поверхность и конденсационная поверхность.

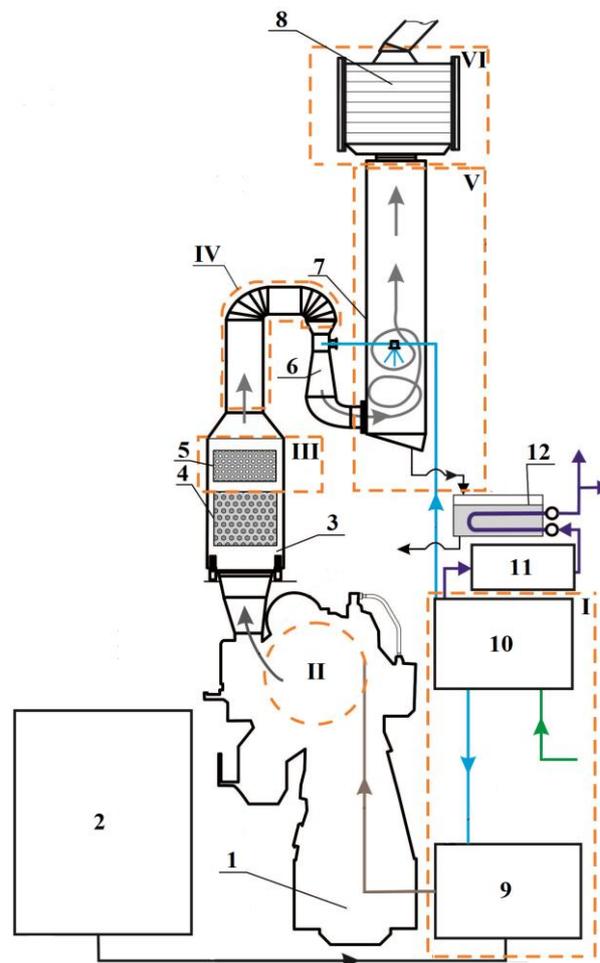


Рис. 1. Схема установки для комплексной очистки газов:

- 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – цистерна запаса топлива; 3 – УК; 4 – сухая конвективная поверхность УК; 5 – конденсационная конвективная поверхность УК; 6 – скруббер Вентури, 7 – абсорбер-циклон; 8 – сушилка; 9 – блок подготовки ВТЭ; 10 – блок обработки и подготовки воды; 11 – теплый ящик; 12 – кавитатор;
- I – кавитационная обработка ВТЭ; II – сжигание ВТЭ с водосодержанием 30 %; III – процессы абсорбции, протекающие на конденсационных конвективных поверхностях УК; IV – процессы, протекающие на поверхности газоходов; V – скрубберная технология очистки газов; VI – подсушка газов

Обязательной является также установка блока подготовки воды и ВТЭ (первый этап очистки га-

зов). Дилуат из блока кавитационной электродиализной подготовки воды подается в теплый ящик (конденсационного блока) и в блок подготовки ВТЭ, куда подводится малосернистое топливо из цистерны запаса. Специально подготовленная ВТЭ подается к форсункам ДВС.

В результате горения активированной ВТЭ на выходе из двигателя получаем выхлопные газы соответствующего состава с уменьшенным количеством токсичных ингредиентов до 35 % и более и главное, близким к эквимолярному отношению $\text{NO}_2 : \text{NO}$ в NO_x (что подтверждается нашими экспериментальными [4] и литературными данными). Это второй этап очистки выхлопных газов, позволяющий на 30...50% снизить, например, концентрацию NO_x .

Далее на тракте ДВС выхлопные газы поступают в УК, в котором на входе установлена сухая конвективная поверхность (пароперегревателя, парообразующей поверхности), а на выходе - конденсационная конвективная поверхность в виде экономайзера и (или) секции горячего водоснабжения с температурой металла на уровне 70...130 °С, что приводит к конденсации паров серной кислоты, находящейся в выхлопных газах ДВС.

В конденсате кислоты при указанных условиях устанавливается средняя концентрация около 57 %. В результате обеспечивается резкий рост абсорбции SO_2 и NO_x . Наличие в них эквимолярного (или близкого к нему) соотношения $\text{NO}_2 : \text{NO}$ обеспечивает пассивацию конденсационной поверхности из углеродистой стали. Это обеспечивает резкое уменьшение интенсивности низкотемпературной коррозии (НТК), повышение надежности эксплуатации этих конденсационных поверхностей и возможность резкого увеличения глубины утилизации выхлопных газов двигателя до ~ 80...90 °С вместо 160 °С (при сжигании стандартных топлив). Таким образом выполняется третий этап очистки газов.

Далее газы после УК попадают в газоход, который подводит эти газы к скрубберной части комплексной системы. При такой низкой температуре газов и обеспечении температуры металла газохода после ДВС на уровне 70...80 °С, то есть при наличии конденсата серной кислоты на внутренней поверхности газоходов, будет продолжаться процесс абсорбции токсичных веществ при надежной работе металла газохода, дополнительно снижаться интенсивность массопотока H_2SO_4 и НТК (это четвертый этап очистки газов). Это связано с тем, что в газах имеет место эквимолярное отношение $\text{NO}_2 : \text{NO}$, а значит будет обеспечена пассивация поверхности металла и снижение НТК при минимальной разнице температур газов и металла газоходов.

Таким образом, выполнение указанных этапов очистки газов, обеспечивает снижение содержание токсичных ингредиентов в газах перед скрубберной частью очистки газов почти на 50 % (по сравнению с существующими технологиями, в которых обеспечивается снижение температуры газов в УК до 160 °С) и частичную очистку от твердых частиц [5], содержащихся в газах (при сжигании ВТЭ твердых и сажистых частиц на 80 % меньше, чем при сжигании стандартных топлив).

Несмотря на более низкий уровень токсичных ингредиентов по сравнению с [1-3], на этом этапе комплексной системы еще не удастся достичь необходимого уровня снижения концентрации токсичных ингредиентов в выхлопных газах. Поэтому газы направляются дальше к следующему этапу очистки - скрубберной технологии. Так как в предлагаемой схеме (см. рис. 1) рассматривается вариант комплексной системы при использовании малосернистого топлива и ВТЭ на его основе, то предлагается вариант установки на тракте газов ДВС скруббера Вентури и циклона-абсорбера с подачей к ним охлажденного активированного католита с повышенными абсорбционными свойствами (пятый этап очистки газов).

После взаимодействия в скрубберах католита с газами получаются практически нейтральные растворы, так как католит обладает щелочными свойствами, а абсорбируемые вещества - кислотными свойствами. Подогретый раствор после циклона на тракте ДВС собирается в цистерне. Подогрев этих растворов в скрубберах происходит за счет процессов абсорбции и теплоты конденсации водяных паров газов после ДВС. Поэтому теплоты раствора и полученного значения температурного напора достаточно для подогрева питательной воды для УК и для горячего водоснабжения. Охлажденный раствор, щелочность которого находится на уровне 6,5...7,0, что соответствует экологическим требованиям, сбрасывается в цистерну для очистки или за борт в зависимости от качества раствора. Таким образом, выполняется пятый этап очистки газов.

Учитывая конденсацию значительного количества водяных паров выхлопных газов, после циклона на тракте ДВС выхлопные газы будут увлажненные и обладать коррозионными свойствами. Поэтому сразу на выходе газов из циклона необходимо установить сушилку для газов (шестой этап очистки газов). Это обеспечит надежную работу газохода после циклона.

Экспериментальные исследования показали: 1 м² конденсационной поверхности абсорбирует 3,4 мг/м³ NO_x и 0,89 мг/м³ SO_2 . При этом важно, что дополнительно имеет место процесс осаждения токсичных твердых зольных и сажистых частиц: от

150...170 мг/м³ (на виході з топки при сжиганні ВТЭ с W^r = 30 %) до 50...60 мг/м³ після конденсаційної поверхності.

Выводы

При сжиганні ВТЭ с водосодержанням 30 % знижується інтенсивність НТК, що дозволяє установити конденсаційні поверхності нагріву в УК. Установка конденсаційної поверхності нагріву в УК знижує вміст в газах NO_x на 55 %, SO₂ - на 50 %, а вміст твердих частинок - в 3 рази. Використання комплексної системи забезпечує очищення газів від токсичних інгредієнтів і теплових викидів до рівня, рекомендованого ІМО.

Литература

1. Skeltved, O. *CIMAC NMA (Norway 27/01/2010)*. [Online]: MAN Diesel©. – 2010. – 48 p. – Available at: <http://sintef.net/upload/MARINTEK/CIMAC2010/MAN%20Qle%20Skeltved.pdf>. – 04.09.2013.
2. Baskar, P. *Experimental investigation on performance characteristics of a diesel engine using diesel-water emulsion with oxygen enriched air [Text] / P. Baskar, A. Senthil Kumar // Alexandria Engineering Journal*. – 2017. – Vol. 56, No 1. – P. 137-146. DOI: 10.1016/J.AEJ.2016.09.014.
3. Semakula, M. *The Effects of Exhaust Gas Recirculation on the Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine – A Critical Review [Text] / M. Semakula, F. Inambao // International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – Vol. 12, No. 23. – P. 13677-13689.
4. Пат. 99408 Україна, МПК C23F 11/10, F22B 37/00, F23J 15/00. Спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчанокислотної корозії [Текст] / В. Ю. Горячкін, А. В. Горячкін, О. В. Акімов, В. С. Корнієнко ; заяв-

ник НУК. – №а201110299 ; заявл. 23.08.11 ; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15. – 8 с.

5. *Semi-empirical correlations of pollution processes on the condensation surfaces of exhaust gas boilers with water-fuel emulsion combustion [Text] / M. Radchenko, R. Radchenko, V. Kornienko, M. Pyry-sunko. – In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham. – 2020. – P. 853-862. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_85.*

References

1. Skeltved, O. *CIMAC NMA (Norway 27/01/2010)*. MAN Diesel©, 2010. 48 p. Available at: <http://sintef.net/upload/MARINTEK/CIMAC2010/MAN%20Qle%20Skeltved.pdf>. (accessed 04.09.2013).
2. Baskar, P., Senthil Kumar, A. Experimental investigation on performance characteristics of a diesel engine using diesel-water emulsion with oxygen enriched air. *Alexandria Engineering Journal*, 2017, vol. 56, no 1, pp. 137-146. DOI: 10.1016/J.AEJ.2016.09.014.
3. Semakula, M., Inambao, F. The Effects of Exhaust Gas Recirculation on the Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine – A Critical Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 23, pp. 13677-13689.
4. Horyachkin, V. Yu., Horyachkin, A. V., Akimov, O. V., Korniyenko V. S. *Sposib zahistu metalu niz'kotemperaturnih poverhon' nagrivu kotla vid sirchanokislotnoï korozii* [Method for metal protection of low-temperature surfaces of boiler heating from sulfuric-acid corrosion]. Patent UA, no. 99408, 2012.
5. Radchenko, M., Radchenko, R., Kornienko, V., Pyry-sunko, M. *Semi-empirical correlations of pollution processes on the condensation surfaces of Exhaust Gas boilers with water-fuel emulsion combustion*. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020, pp. 853-862. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_85.

Поступила в редакцію 15.04.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ВИКОРИСТАННЯ ЦИКЛОНУ І ЕФЕКТУ "МІКРОВИБУХІВ" КРАПЕЛЬ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ОЧИЩЕННЯ ВИХЛОПНИХ ГАЗІВ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

В. С. Корнієнко, Р. М. Радченко

Отримання додаткової енергії за рахунок глибокої утилізації теплових втрат двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) дозволяє економити паливо, що витрачається на роботу суднової енергетичної установки. Це, відповідно, веде до зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, сприяє задоволенню більш жорстких норм Міжнародної морської організації ІМО (International Maritime Organization), яка регламентує межі цих викидів. Метою дослідження є розробка технології комплексного очищення вихлопних газів ДВЗ. Для вирішення завдань з технології запропонованого способу очищення вихлопних газів передбачено 6 етапів технологічного процесу. На основі проведених експериментально-теоретичних досліджень була розроблена схема установки для комплексного очищення газів при використанні циклону й ефекту "мікрОВИБУХІВ" крапель водопаливної емульсії (ВПЕ). Встановлено, що в результаті горіння активованої ВПЕ на виході з двигуна отримують вихлопні гази відповідного складу зі зменшеною кількістю токсичних інгредієнтів до 35 % і

більше і головне, з близьким до еквімолярного відношенням NO_2/NO в NO_x . Проведені експериментальні дослідження показали, що в конденсаті кислоти при зазначених умовах встановлюється середня концентрація близько 57 %, що і забезпечує різке зростання абсорбції SO_2 і NO_x . Наявність в газах еквімолярного (або близького до нього) співвідношення NO_2/NO забезпечує пасивацію конденсаційної поверхні в утилізаційному котлі (УК) з вуглецевої сталі. Це забезпечує різке зменшення інтенсивності низькотемпературної корозії, підвищення надійності експлуатації конденсаційних поверхонь і можливість різкого збільшення глибини утилізації вихлопних газів двигуна до 80...90 °C замість 160 °C. Для кінцевого очищення газів запропоновано встановити на тракті газів ДВЗ скруббер Вентурі і циклон-абсорбер. На основі експериментальних досліджень визначено, що встановлення конденсаційної поверхні нагріву в УК знижує вміст в газах NO_x на 55 %, SO_2 – на 50 %, а вміст твердих часток – в 3 рази. Розроблена комплексна система може використовуватись для очищення вихлопних газів ДВС до рівня, рекомендованого ІМО.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; водопаливні емульсії; циклон; скруббер Вентурі; глибока утилізація; низькотемпературна корозія.

APPLICATION THE CYCLONE AND EFFECT OF "MICROEXPLOSIONS" DROPS OF WATER-FUEL EMULSION FOR COMPLEX CLEANING OF EXHAUST GASES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

V. S. Kornienko, R. M. Radchenko

Obtaining additional energy due to the deep utilization of the internal combustion engine (ICE) heat losses allows saving fuel used for the operation of the ship's power plant. This accordingly leads to a reduction of the emissions of harmful substances into the atmosphere, contributes to meet the more stringent standards of the International Maritime Organization (IMO) governing the limits of these emissions. The study aims to develop the system of complex exhaust gas cleaning for an internal combustion engine (ICE). For solving the tasks in the technology of proposed method there were 6 stages of technological process envisaged. Based on experimental and theoretical studies, a setup for complex exhaust gas cleaning using a cyclone and the effect of "microexplosions" of a water-fuel emulsion (WFE) droplet was developed. It has been established that as a result of activated WFE combustion we obtain at the engine outlet exhaust gases of a corresponding composition with a reduced amount of toxic ingredients down to 35 % and below and most importantly – an equimolar ratio of NO_2/NO to NO_x . Experimental studies have shown that in the condensate acid under these conditions, an average concentration of about 57 % is established, which ensures a sharp increase in the absorption of SO_2 and NO_x . The presence of an equimolar (or almost this) NO_2/NO ratio in gases ensures the passivation of the condensation surface in exhaust gas boiler (EGB) from carbon steel. This ensures a sharp decrease in the low-temperature corrosion intensity, an increase in the operating reliability of condensation surfaces and the possibility of a sharp increase in the engine exhaust gas utilization depth to 80...90 °C instead of 160 °C. For the final gas cleaning, it was proposed to install a venturi scrubber and a cyclone-absorber on the gas path of ICE. Based on experimental studies, it has been established that the installation of a condensation heating surface in the EGB reduces the NO_x content in gases by 55 %, SO_2 - by 50 %, and the content of solid particles - by 3 times. The developed complex system can be used to clean the ICE gases to the level recommended by IMO.

Keywords: internal combustion engine; water-fuel emulsions; cyclone; venturi scrubber; deep utilization; low-temperature corrosion.

Корниенко Викторія Сергеевна – канд. техн. наук, доц. кафедри теплотехники, Херсонський філіал Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Радченко Роман Николаевич – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Николаєв, Україна.

Kornienko Victorya Sergiivna – PhD, Associate professor of Department of heat engineering, Kherson branch of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: kornienkovika1987@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-3524-2045.

Radchenko Roman Mykolayovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8099-7327.